

# 校舎3Dモデルを用いた煙シミュレーションVR防災教育システムの開発

愛媛県立松山南高等学校

第8回中高情報学コンテスト

## -背景-

### 火災による死亡原因の約70%は煙の吸引

煙による視界不良で適切な避難経路を選択できないことも重大な要因

火災時の煙の挙動を体験する訓練が困難



#### [火災発生時の問題]

[生徒・教職員]

煙がどう広がるかわからない...

[施設管理者]

避難誘導の最適ルートは？

#### [仮説]

煙の挙動を正確にシミュレーションした  
VR体験システムがあれば解決できるのでは？

## -目的-



経済性  
Economical

既存設備を活用した  
低コスト実現



利便性  
Convenience

誰でも簡単に  
VR体験可能



安全性  
Safety

命を守る判断力  
向上に貢献

### 煙シミュレーションプロジェクトの特徴

- 物理法則に基づく正確な煙の動き
- 実際の校舎構造を正確に再現
- MetaQuestでの没入体験
- 様々な火災シナリオの体験

防災教育の学習効果を飛躍的に向上させ、  
実際の避難行動での生存率向上に貢献する

## -技術的アプローチ-



Scaniverse  
校舎3Dスキャン



Blender  
煙物理シミュレーション



vcpkg変換  
OpenVDB→nanoVDB



Unity  
nanoVDBレンダリング



MetaQuest  
VR没入体験

### Blender煙シミュレーション

物理法則に基づく煙の自然な動きを再現

移流方程式:  $\partial \rho / \partial t + (u \cdot \nabla) \rho = 0$

拡散方程式:  $\partial \rho / \partial t = D \nabla^2 \rho$

非圧縮条件:  $\nabla \cdot u = 0$

- ドメイン設定: 校舎内部空間を正確に再現
- 物理パラメータ: 温度、密度、速度を実火災データに基づき調整
- 解像度の最適化: VRでも滑らかな動作のバランス調整
- バイク処理: 事前計算による高速化

### vcpkg変換プロセス

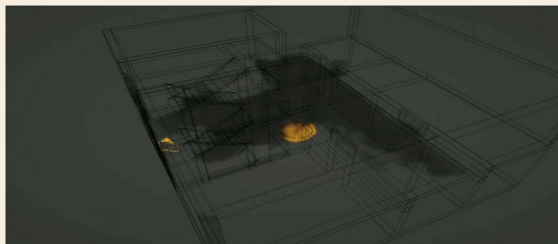
```
# OpenVDBのインストール
vcpkg install openvdb

# openVDB→nanoVDBへの変換
nanovdb_convert input.vdb output.nvdb
```

vdbファイル: Blenderから出力された煙シミュレーションデータ

Nvdbファイル: Unity+MetaQuestで効率的に扱えるように最適化

- ファイルサイズ: 約70%削減
- メモリ効率: GPUレンダリングに最適化



### Unity nanoVDBレンダリング

GitHub: andersblomqvist/unity-nanovdb-renderer を活用

#### 【主要コンポーネント】

- NanoVolumeCustomPass.cs - レンダリング制御
- NanoVolumeCustomPassShader.shader - レイマーチング呼び出し
- NanoVolumeLoader.cs - nanoVDBデータ読み込み
- NanoVolumePass.hlsl - 実際のレイマーチング処理
- PNanoVDB.hlsl - OpenVDBのC++ライブラリラッパー

- 複数フレームのnanoVDBを連続表示するアニメーション機能を実装



MetaQuest3Sでの没入体験。  
煙の中での視界不良状態を体感可能

### リアルタイムレンダリング技術

- 逆投影行列:  $P^{-1} = (VP)^{-1}$  によるレイ方向計算
- 体積分:  $I = \int \int \int \rho(x,y,z) dV$  による密度計算
- アルファ値:  $\alpha = 1 - e^{-t}$  による透明度表現
- 階層的DDA (Digital Differential Analyzer) によるレイマーチング高速化

### MetaQuest実装

- Unity OpenXR Package による実装
- MetaQuest3S向けに最適化したレンダリング設定
- スタンドアロン実行のためのパフォーマンス調整
- 6DoF (6自由度) による自然な視点移動
- マルチモーダル(視覚・聴覚)による臨場感向上

## -開発過程の課題と解決策-

2024年10月

### 課題

Blenderでの煙シミュレーションデータを生成する必要がある

### 解決策

Blenderの流体シミュレーション機能を使用し、移流方程式・拡散方程式・非圧縮条件を用いた高精度シミュレーションを実装。結果は大成!

2024年11月初旬

### 課題

Unity+OpenXRでMetaQuest3Sへ統合しようとしたが、煙のシミュレーションデータがOpenVDBという特殊な形式で、Unityで直接読み込めない

### 解決策

GitHubでOpenVDBforUnityパッケージを発見するが、7年前のものでUnityの最新版には対応していないことが判明

2024年11月下旬

### 課題

ZibbraEffectなどのVFXパッケージを使用しようとしたが、これもOpenXRなどのパッケージと対応していないことが判明

### 解決策

リアルタイムシミュレーション・レンダリングの方法を検討したが、MetaQuestのスペックでは処理負荷が高すぎるのが問題に

2024年12月中旬

### 課題

シミュレーションデータあり、Unity移行不可、外部パッケージ不可、リアルタイム処理も不可という難関に直面

### 解決策

GitHubでnanoVDBのUnityレンダリング成功例を発見! nanoVDBはOpenVDBの最適化版で、最新Unityに対応している

2024年12月下旬

### 課題

OpenVDBをnanoVDBに変換する方法が必要

### 解決策

vcpkgのOpenVDBモジュールにOpenVDBとnanoVDBを変換するシステムが含まれていることを発見! vcpkg環境を構築し変換に成功

2025年1月

### 課題

複数のnanoVDBをアニメーションとして表示する必要がある

### 解決策

C++とC#コードを編集・作成し、複数のnanoVDBをアニメーションのように表示させることに成功。MetaQuest上での動作も確認

## -実証評価の科学的根拠-



体感型VR学習による効果



実際の避難行動での効果

### 科学的根拠

- PMC研究: VR訓練で3ヶ月後スキル保持率85%
- NICU研究: 統計的有意な性能向上
- 複数の国際研究でVR学習効果を実証

## -今後の展望-

本システムをさらに発展させるため、以下の5つの方向性を検討しています

- 多様な火災シナリオ: 複数の火元、季節・時間帯変更、気象条件の導入
- AI個別最適化: 理解度に応じたシナリオ生成、個人に合わせた難易度調整
- 他校への展開: 共有プラットフォーム構築、学校固有のデータに合わせた展開
- 評価システム強化: 行動ログ分析、長期追跡調査による効果測定
- 地域防災センター連携: 地域全体の防災意識向上、多世代での活用